ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.15

1967—2017年甘肃省小麦需水量和缺水量时空特征①

张 华, 王 浩
(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:基于甘肃省28个气象站点1967—2017年的逐日气象数据,采用Penman-Monteith公式和作物系数计算了小麦的需水量,结合美国农业部土壤保持局推荐的方法计算了有效降水量,进一步得出小麦缺水量,并分析了小麦需水量与缺水量的变化趋势和空间分布特征,探讨了小麦需水量影响因子重要程度。结果表明:1967—2017年甘肃省春、冬小麦全生育期的年平均需水量分别为517.03 mm和436.70 mm,年平均缺水量分别为468.24 mm和301.54 mm;在时间上,51 a来春小麦种植区内的需水量与缺水量整体上无明显的趋势变化,而冬小麦种植区内的需水量与缺水量整体上呈明显上升趋势;在空间上,春小麦种植区内需水量和缺水量大致由西北向东南递减,冬小麦种植区内的需水量和缺水量大致由西向东递减。甘肃省小麦生育期内日照时数和日平均气温是影响小麦需水量的主要因素。

关 键 词: Penman-Monteith公式; 需水量; 缺水量; 有效降水量; 甘肃省

chinaXiv:201909.00155v1

作物需水量是指作物生长期间,在适宜的土壤水分条件下的棵间蒸发量与叶面蒸腾量的总和,是作物本身生物学特性与环境条件综合作用的结果[1]。作物需水量与缺水量数据是进行农业水资源分配、农业水利工程设计的重要参考指标,掌握作物的需水与缺水规律可以制定合理的农业灌溉方案,对农业发展和水资源的合理利用具有重要的现实意义[2-3]。甘肃省属于内陆灌溉区,水资源短缺已经成为农业发展的首要限制因子[4]。小麦是甘肃省主要粮食作物之一,2017年甘肃省小麦播种面积占全省农作物播种面积的17.92%[5]。较大的种植面积也使得小麦需水量增大,进一步加重了甘肃省水资源短缺的问题,因此,准确估算农作物的需水量成为研究的热点。

目前,国内外学者对农作物需水量的研究,一种是利用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式和表格化的作物系数计算作物需水量,这种方法成为FAO推荐的唯一模型,被学者广泛运用[6-13];另一种是运用遥感方法评估作物需水量[14-16],但是由于计算精度达不到实际需要,这种方法处于探索阶段[17]。由于地理环境的差异性,导致作物系数并不唯一,采用FAO推荐的作物系数计算大范围的作物需水量,势必会对需水量的计算造成误差[7];同时,甘肃省处于春小麦和冬小麦种植的过渡地带,对小麦种植过渡地带的需水量和缺水量时空特征研究并不多见。因此,本研究基于甘肃省春小麦种植区18个气象站点、冬小麦种植区10个气象站点1967—2017年的逐日气象数据,首先计算各个气象站点的小麦作物系数和全生育期需水量,其次结合甘肃省小麦全生育期内的有效降水量获得缺水量,分析了甘肃省小麦需水量和缺水量的空间格局,最后采用Mann-Kendall检验,揭示甘肃省地区需水量和缺水量变化趋势和突变特征。以期为甘肃省充分利用自然降水,合理分配水资源,提高农业水资源利用效率和缓解水资源短缺危机提供参考。

1 研究区概况

甘肃省地处黄河上游,位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原的交汇地带,地形复杂,属于山地高原型地貌。省内年平均气温0~16 ℃,日照充足,日温

① 收稿日期:2019-03-20; 修订日期:2019-06-30
基金项目:国家自然科学基金项目(41461011)
作者简介:张华(1978-),女,副教授,博士,主要从事生态水文与环境遥感方面的研究工作. E-mail:zhanghua2402@163.com

ChinaXiv合作期刊

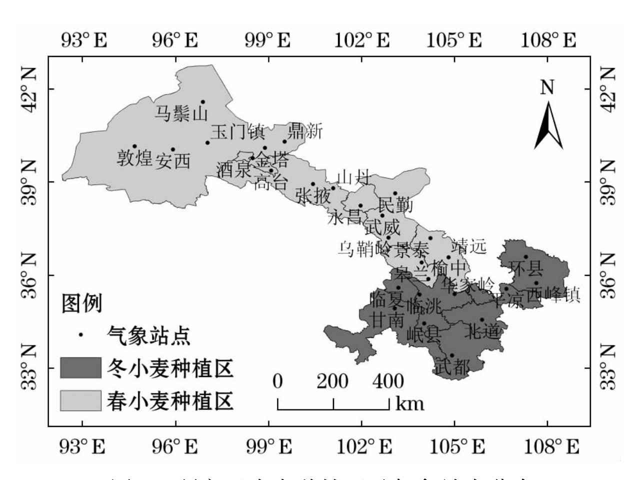


图 1　研究区小麦种植区及气象站点分布

Fig. 1　Wheat planting regions and distribution of meteorological stations in the study area

差大;年降水量 36.6 ~ 734.9 mm,大部分地区处于干旱地带,水资源条件差,属温带大陆性气候[18]。甘肃省处于春小麦与冬小麦的过渡地带,定西、天水、陇南、庆阳、平凉、临夏回族自治州以及甘南藏族自治州等 7 个地州市主要以冬小麦为主;酒泉、张掖、嘉峪关、武威、金昌、白银和兰州主要以春小麦为主[19-20](图 1)。冬小麦播种期一般在 9 月下旬 ~ 10 月上旬,成熟期一般在第 2 年的 6 月中旬 ~ 7 月上旬,全生育期在 250 ~ 290 d 之间;春小麦播种期一般在 3 月中旬,成熟期在 7 月下旬,全生育期约 130 d[21-22]。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

本研究采用甘肃省 28 个地面气象观测站 1967—2017 年逐日气象数据,数据来源于国家气象信息中心(http://data.cma.cn/),所使用的气象要素包括平均气温(℃)、最低和最高气温(℃)、日照时数(h)、平均相对湿度(%)、平均风速($m \cdot s^{-1}$)和降水量(mm)。小麦各生长阶段株高(cm)和各生长发育阶段的起止日期资料来源于《甘肃省农业气象观测资料汇编(1981—1985)》[22],用以计算甘肃省小麦作物系数。

2.2　研究方法

2.2.1　小麦需水量计算　作物需水量一般采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的作物系数法[23]计算,其计算公式为:

$$ET_C = K_C \times ET_0 \tag{1}$$

式中:ET_C 是作物需水量($mm \cdot d^{-1}$);K_C 是作物系数,表征作物生物学特性对需水量的影响[10];ET_0 为某一生长阶段参考作物蒸散量(mm)。

作物系数的计算采用单值平均作物系数法[23-24]。FAO 将作物生长分为 4 个生长阶段,即生长初期(作物播种到对地表的覆盖率达到 10% 为止,此阶段的作物系数为 K_{cini})、生长发育期(作物对地表的覆盖率约 10% 到完全覆盖为止,此阶段的作物系数从 K_{cini} 上升到 K_{cmid})、生长中期(作物对地表完全覆盖到开始成熟为止,此阶段作物系数为 K_{cmid})和生长末期(作物开始成熟到收获为止,该阶段作物系数从 K_{cmid} 下降到 K_{cend})[23]。FAO 推荐的春小麦 $K_{cini} = 0.3$,$K_{cmid} = 1.15$,$K_{cend} = 0.4$;冬小麦 $K_{cini} = 0.4$,$K_{cmid} = 1.15$,$K_{cend} = 0.4$。此外,再根据实际情况对作物系数进行修正,公式如下:

$$K_C = K_{C(FAO)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{2}$$

式中:$K_{C(FAO)}$ 为 FAO 标准条件下各生育阶段的作物系数(K_{cini}、K_{cmid} 和 K_{cend});RH_{min} 为各生育阶段内日最小相对湿度的平均值(%);u_2 为各生育阶段内 2 m 高日平均风速;h 为各生育阶段内作物平均株高(m)。本文利用 14 个农业气象观测站点资料中小麦各生长发育阶段的起止日期和各生育阶段小麦平均株高,以及 28 个气象站点的逐日气象数据,计算了甘肃省春、冬小麦的作物系数(表 1)。为了使农业气象观测站点的数据与气象站点的数据相结合,按照邻近原则分配农业气象观测站点数据,即气象站点与农业气象观测站点相邻,则将两种数据结合计算小麦作物系数。

参考作物蒸散量(ET_0)由 1998 年 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式作为参考标准[23]。计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T + 273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{3}$$

式中:Δ 为饱和水气压曲线的斜率;R_n 为作物表面上的净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$G$ 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$\gamma$ 为湿度计常数($kPa \cdot ℃^{-1}$);u_2 为 2 m 高处的风速($m \cdot s^{-1}$);e_s 为饱和水气压(kPa);e_a 为实际水气压(kPa)。

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

表 1　甘肃省气象站小麦物候信息与作物系数

Tab. 1　Phenological information and K_C of meteorological stations in Gansu Province

小麦	气象站点	农业气象站点	播种期（月－日）	成熟期（月－日）	生长天数/d	生长初期 K_{cini}	生长中期 K_{cmid}	生长末期 K_{cend}
春小麦	敦煌	敦煌	03－15	07－20	127	0.35	1.21	0.45
	安西		03－15	07－20	127	0.36	1.21	0.46
	马鬃山	玉门镇	03－25	07－30	127	0.37	1.26	0.51
	玉门镇		03－25	07－30	127	0.36	1.22	0.47
	金塔	金塔	03－18	07－25	129	0.35	1.21	0.46
	鼎新		03－18	07－25	129	0.35	1.22	0.47
	酒泉		03－18	07－25	129	0.34	1.20	0.44
	高台		03－18	07－25	129	0.33	1.18	0.42
	张掖	张掖	03－10	07－25	137	0.34	1.19	0.44
	山丹		03－10	07－25	137	0.34	1.20	0.45
	永昌	武威	03－20	07－25	127	0.34	1.20	0.44
	武威		03－20	07－25	127	0.33	1.18	0.43
	乌鞘岭		03－20	07－25	127	0.35	1.20	0.44
	民勤	民勤	03－20	07－25	127	0.35	1.21	0.46
	景泰	景泰	03－15	07－25	132	0.31	1.20	0.36
	靖远		03－15	07－25	132	0.29	1.15	0.36
	皋兰		03－15	07－25	132	0.3	1.18	0.36
	榆中		03－15	07－25	132	0.29	1.17	0.38
冬小麦	临洮	临夏	09－25	07－10	288	0.28	1.15	0.39
	临夏		09－25	07－10	288	0.28	1.14	0.39
	甘南		09－25	07－10	288	0.29	1.15	0.39
	岷县		09－25	07－10	288	0.28	1.14	0.40
	华家岭	通渭	09－25	07－20	298	0.41	1.20	0.43
	北道	天水	10－15	06－30	258	0.38	1.16	0.39
	武都	成县	10－20	06－25	248	0.39	1.17	0.41
	环县	环县	09－25	07－10	288	0.39	1.18	0.42
	西峰镇	西峰	09－15	07－05	293	0.38	1.17	0.41
	平凉	泾川	10－01	06－30	272	0.39	1.17	0.40

2.2.2　小麦缺水量计算　小麦缺水量等于小麦生育期的需水量与同时期的有效降水量之差[25]。计算公式为：

$$W = \sum_{1}^{n} ET_{C} - \sum_{1}^{n} P_{e} \qquad (4)$$

式中：W 为小麦生育期总缺水量（mm）；n 为小麦生育期日数（d）；ET_C 为作物需水量（mm·d^{-1}）；P_e 为有效降水量（mm·d^{-1}）。

本研究中的有效降水量计算采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法[26-27]，其计算公式为：

$$P_e = \begin{cases} \dfrac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & (P < 8.3\ \mathrm{mm \cdot d^{-1}}) \\ 4.17 + 0.1P & (P \geq 8.3\ \mathrm{mm \cdot d^{-1}}) \end{cases} \qquad (5)$$

式中：P_e 为有效降水量（mm·d^{-1}），P 为总降水量（mm·d^{-1}）。

2.2.3　Mann-Kendall 趋势与突变检验　Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验的方法，这种方法不仅可以检验时间序列的变化趋势，还可以检验时间序列是否发生了突变[28-31]。本文运用 Matlab 软件对甘肃省 28 个气象站点的需水量与缺水量进行趋势检验，得到倾斜率 β；对春小麦与冬小麦种植区总需水量与缺水量进行突变检验，得到 UB 与 UF 两条曲线。若不能确定是否为突变点，再用滑动 t 检验法[29]（子序列最小取值为 5 a，显著性水平为 $\alpha = 0.01$）对可能存在的突变点进行验证，以增强突变分析的可靠性[32]。

2.2.4　空间插值　将得到的小麦生育期内的降水量、有效降水量、需水量和缺水量等数据，运用 Arc-

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

GIS10.2 中的反距离权重插值方法(IDW)进行空间插值,得到相应的空间分布。

2.2.5　灰色关联度分析　灰色关联度分析法一种多因素统计分析方法[30,33]。此方法不仅运用在其他领域,在农作物蒸散发方面也有所应用[7,34-35]。本文利用灰色关联分析法计算春、冬小麦生育期需水量与日平均气温、日照时数、日平均相对湿度和日平均 2 m 高风速的关联度。

3　结果与分析

3.1　时间变化

3.1.1　春小麦全育期需水量与缺水量年际变化

甘肃省 1967—2017 年春小麦全育期各站点平均需水量最高为 1974 年的 572.97 mm,最低为 1993 年的 462.80 mm,各站点 51 a 平均需水量为 517.03 mm,整体呈上升趋势,但未通过 0.01 水平的显著性检验(图 2a)。根据 Mann-Kendall 突变检验,*UF* 与 *UB* 曲线在置信区间内存在两个明显交点(图 2c)。再经过滑动 *t* 检验,这两点均不是突变点。因此甘肃省春小麦全育期需水量没有明显的趋势变化,也不存在突变点。

甘肃省 1967—2017 年春小麦全育期各站点平均缺水量最高为 1974 年的 530.09 mm,最低为 1993 年的 462.80 mm,各站点 51 a 平均缺水量为 471.27 mm,整体上也呈上升趋势(图 2b),但未通过 0.01 水平的显著性检验。根据 Mann-Kendall 突变检验,*UF* 与 *UB* 曲线在置信区间内有 4 个交点(图 2d)。再经过滑动 *t* 检验,这 4 个点均不是突变点。因此甘肃省春小麦全育期缺水量没有明显的趋势变化,也不存在突变点。

3.1.2　冬小麦全育期需水量与缺水量年际变化

甘肃省 1967—2017 年冬小麦全育期各站点平均需水量最高为 2006 年的 482.22 mm,最低为 1989 年的 370.80 mm,各站点 51 a 平均年需水量为 436.70 mm,整体上呈显著上升趋势,通过 0.01 水平的显著性检验(图 3a)。根据 Mann-Kendall 突变检验,*UF* 与 *UB* 曲线在置信区间内存在一个明显交点,交点位于 2002 年(图 3c)。这表明 2002 年是需水量由下降到上升趋势的突变点。

甘肃省 1967—2017 年冬小麦全育期各站点缺水量最高为 2004 年的 378.95 mm,最低为 1967 年的 174.56 mm,各站点 51 a 平均年需水量 288.87 mm,整体上呈显著上升趋势,通过 0.01 水平的显著性检验(图 3b)。根据 Mann-Kendall 突变检验,*UF* 与 *UB* 曲线在置信区间内存在两个明显交点(图 3d)。再经过滑动 *t* 检验,这两个点均不是突变点。因此,甘肃省春小麦全育期缺水量存在明显的上升趋势,但不存在突变点。

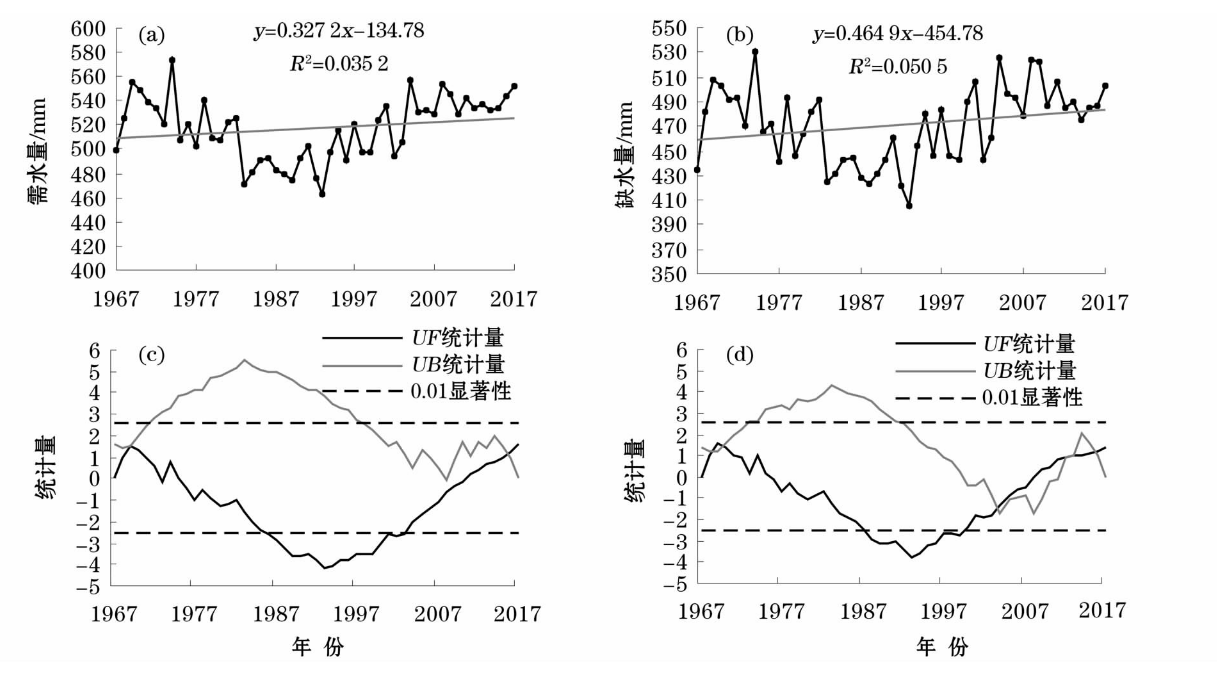


图 2　1967—2017 年甘肃省春小麦全育期需水量与缺水量年际变化及 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 2　Water requirement and water deficit interannual variability and Mann-Kendall test in whole growing period of spring wheat from 1967 to 2017 in Gansu Province

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

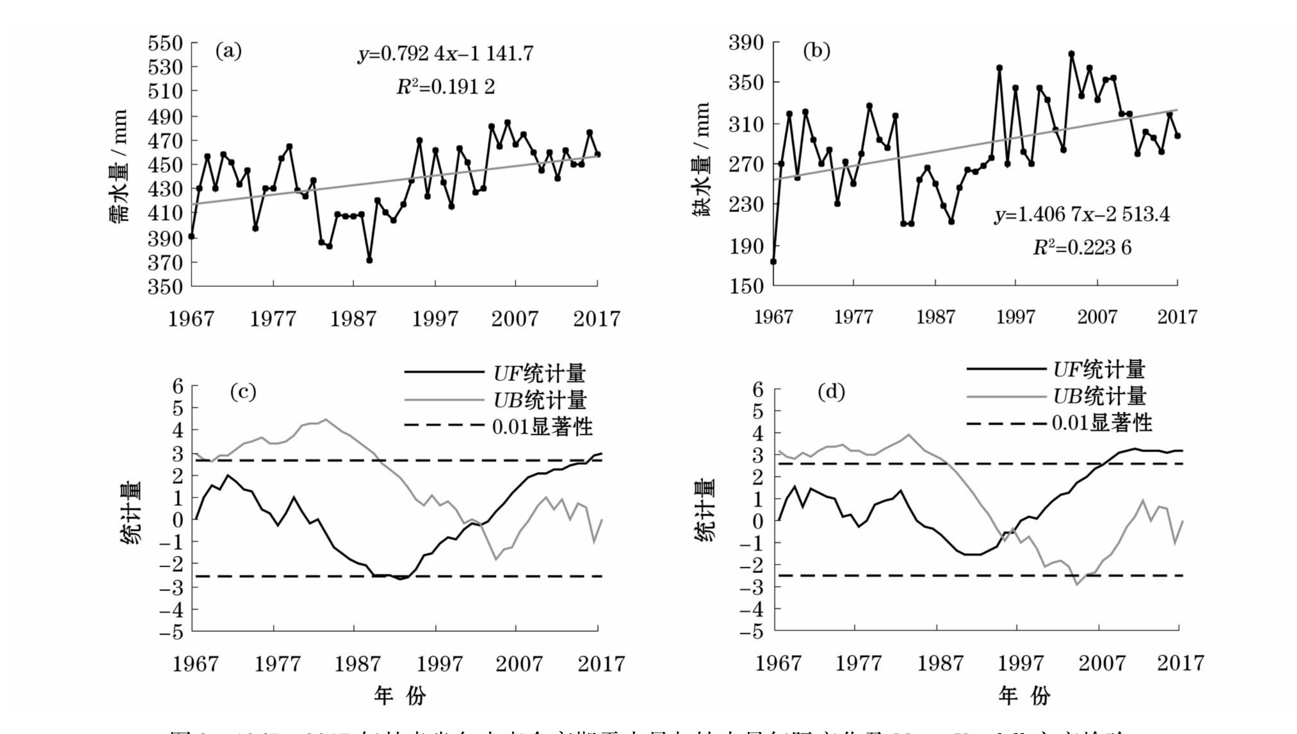


图 3　1967—2017 年甘肃省冬小麦全育期需水量与缺水量年际变化及 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3　Water requirement and water deficit interannual variability and Mann-Kendall test in whole growing period of winter wheat from 1967 to 2017 in Gansu Province

3.1.3　甘肃省春、冬小麦全育期各站点需水量与缺水量变化　运用 Mann-Kendall 趋势检验法，对甘肃省小麦 28 个气象站点 1967—2017 年的平均需水量与缺水量的变化趋势进行分析(表 2)。在春小麦种植区的 18 个气象站点中，马鬃山、高台、张掖、武威、民勤、靖远和榆中 7 个站点的需水量与缺水量整体呈显著上升趋势，占比 38.89%；玉门镇 1 个站点的需水量与缺水量呈显著下降趋势，占比 5.56%；其余的 10 个站点的需水量与缺水量变化趋势不明显，占比 55.56%，故在春小麦种植区，需水量与缺水量整体变化趋势不明显。在冬小麦种植区的 10 个气象站点中，临夏、临洮、平凉、甘南、岷县、武都和北道 7 个站点的需水量呈显著上升趋势，占比 70%；其余的 3 个站点需水量变化趋势不明显，占比 30%，故在冬小麦种植区，需水量整体呈上升趋势；临洮、甘南、岷县、武都和北道 5 个站点的缺水量呈显著上升趋势，占比 50%；其余 5 个站点缺水量变化趋势不明显，占比 50%，故在冬小麦种植区，缺水量也有一定程度上升趋势。

3.2　空间分布

3.2.1　春小麦全育期的需水量与缺水量空间分布

甘肃省 1967—2017 年春小麦全育期平均降水量在 20.23(高台)~207.74 mm(乌鞘岭)之间，平均值为 73.72 mm，变化幅度为 187.51 mm，整体上呈现出由西北向东南递增的特征；春小麦全育期的平均有效降水量在 14.36(高台)~126.90 mm(乌鞘岭)之间，平均值为 45.76 mm，变化幅度为 112.54 mm，整体上均呈现出由西北向东南递增的特征。降水量和有效降水量空间分布特征趋于一致(图 4)。

甘肃省 1967—2017 年春小麦全育期的平均需水量在 312.77(乌鞘岭)~656.21 mm(马鬃山)之间，平均值为 517.03 mm，变化幅度为 343.44 mm，整体上呈现出由西北向东南递减的特征；春小麦全育期的平均缺水量在 185.88(乌鞘岭)~628.02 mm(马鬃山)，平均值为 468.24 mm，变化幅度为 442.14 mm，整体上均呈现出由西北向东南递减的特征。需水量和缺水量空间分布特征趋于一致(图 4)。

春小麦全育期平均缺水量变化幅度最大，其次为平均需水量和平均降水量，平均有效降水量变化幅度最小。平均降水量和有效降水量与平均需水量和缺水量空间分布特征相反，即平均降水量偏低的地方，平均有效降水量也偏低，而平均需水量和缺水量偏高。

3.2.2　冬小麦全育期需水量与缺水量空间分布

甘肃省 1967—2017年冬小麦全育期平均降水量在

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00155v1

表 2　春、冬小麦种植区需水量与缺水量的 Mann-Kendall 趋势检验

Tab. 2　Mann-kendall test of water requirments and deficit in spring and winter wheat growing areas

	气象站点	需水量 Mann-Kendall 检验 倾斜度 (β)	统计量 (Z_c)	显著性 α = 0.01	缺水量 Mann-Kendall 检验 倾斜度 (β)	统计量 (Z_c)	显著性 α = 0.01
春小麦	马鬃山	1.950 8	6.644 0	显著	2.173 0	6.189 1	显著
	敦煌	0.702 7	1.608 2	不显著	0.676 8	1.510 7	不显著
	安西	-0.868 1	-1.998 1	不显著	-0.934 9	-1.998 1	不显著
	玉门镇	-1.414 2	-5.052 0	显著	-1.598 1	-4.905 8	显著
	鼎新	0.741 1	1.397 0	不显著	0.701 4	1.332 0	不显著
	金塔	0.290 6	0.698 5	不显著	0.283 0	0.552 3	不显著
	酒泉	0.430 4	1.218 3	不显著	0.377 8	1.023 4	不显著
	高台	0.991 7	4.158 6	显著	1.314 5	5.571 8	显著
	张掖	1.603 3	3.216 4	显著	1.530 0	3.021 5	显著
	山丹	-0.463 6	-1.624 4	不显著	-0.474 4	-1.380 8	不显著
	永昌	0.475 3	1.559 5	不显著	0.375 1	1.137 1	不显著
	武威	1.025 5	2.940 2	显著	1.296 6	3.054 0	显著
	民勤	0.877 4	3.070 2	显著	0.864 9	2.550 4	显著
	乌鞘岭	0.075 9	0.406 1	不显著	0.510 7	1.234 6	不显著
	景泰	-1.095 4	-1.981 8	不显著	-1.221 1	-1.851 9	不显著
	皋兰	-0.312 3	-0.974 7	不显著	0.378 6	0.454 8	不显著
	靖远	1.485 3	4.191 1	显著	1.836 9	3.866 2	显著
	榆中	1.035 9	3.508 8	显著	1.556 9	3.330 1	显著
冬小麦	临夏	0.606 6	2.566 6	显著	1.015 5	2.193 0	不显著
	临洮	1.027 4	3.817 4	显著	2.166 9	4.580 9	显著
	华家岭	0.208 7	0.844 7	不显著	1.230 7	2.258 0	不显著
	环县	0.389 4	1.120 9	不显著	0.595 8	0.909 7	不显著
	平凉	0.923 2	2.387 9	显著	1.175 7	1.835 6	不显著
	西峰镇	0.715 7	1.738 2	不显著	0.943 3	1.315 8	不显著
	甘南	0.702 8	4.483 5	显著	1.813 7	4.467 2	显著
	岷县	1.128 4	4.922 1	显著	2.345 5	4.678 4	显著
	武都	1.200 1	2.956 5	显著	1.427 5	2.842 8	显著
	北道	1.019 5	3.297 6	显著	1.361 3	3.248 9	显著

176.92(武都)~321.45 mm(岷县)之间,平均值为 252.33 mm,变化幅度为 144.53 mm,整体呈现出由西向东减少的特征。冬小麦全育期平均有效降水量在 109.79(武都)~195.13 mm(甘南)之间,平均值为 147.83mm,变化幅度为 85.34 mm,整体呈现出由西向东减少的特征。降水量和有效降水量空间分布特征趋于一致(图 5)。

甘肃省 1967—2017 年冬小麦全育期平均需水量在 353.56(甘南)~539.24 mm(华家岭)之间,平均值为 436.70 mm,变化幅度为 185.68 mm,整体呈现出由西南向东北递增的趋势。冬小麦全育期平均缺水量在 158.09(甘南)~427.16 mm(环县)之间,平均值为 301.54 mm,变化幅度为 269.07 mm,整体呈现出由西向东递增的特征。需水量和缺水量空间分布特征趋于一致(图 5)。

冬小麦全育期平均缺水量变化幅度最大,其次为平均需水量和平均降水量,平均有效降水量变化幅度最小。平均降水量和有效降水量与平均需水量和缺水量空间分布特征相反,即平均降水量偏低的地方,平均有效降水量也偏低,而平均需水量和缺水量偏高。

3.3　小麦需水量与主要气象因子的关联度分析

日照时数、大气温度、相对湿度和风速是决定蒸发的重要气象因子,这些气象因子对作物蒸发影响的重要程度不同。由表 3 可以得出,在春小麦种植区,影响小麦需水量变化的因素依次是日照时数、日平均气温、日平均 2 m 高风速、日平均相对湿度;在冬小麦种植区,影响小麦需水量变化的因素依次是日照时数、日平均气温、日平均相对湿度、日平均 2 m 高风速。表明甘肃省小麦需水量最主要的影响因子为日照时数和日平均气温,日平均相对湿度和日平均 2 m 高风速影响相对较小。

3.4　主要气象因子的年际变化

为了探讨以上 4 个气象因子的年际变化,本文计算了气象因子随时间变化的线性倾向率(表 4)。1967—2017 年,春小麦生育期内的日平均气温和日平均 2 m 高风速均呈极显著上升趋势,日平均相对湿度呈极显著下降趋势,平均日照时数基本保持不变;冬小麦生育期内的日平均气温呈极显著上升趋势,日平均相对湿度呈极显著下降趋势,平均日照时数呈显著上升趋势,日平均 2 m 高风基本保持不变。

由图 6 和图 7 可知,1967—2017 年甘肃省小麦需水量与日平均气温、日平均 2 m 高风速和平均日照时数的年际变化特征整体上趋于一致,而与日平均相对湿度的年际变化特征整体上相反。这是因为太阳辐射是土壤水分汽化和作物蒸腾作用的能源,可以直接决定作物需水量的多少,大气温度可以将能量传输到作物上,影响作物蒸腾速率,近地面风速决定了空气中水汽的迁移,三者之间相互作用,因而导致了小麦需水量的年际变化与此 3 个气象因子的年际变化趋向一致。相对湿度表示空气中水汽的饱和度有多高,水汽饱和度越高,则空气中能容纳的作物蒸腾和土壤水分蒸发的水汽则越少,从而导致了小麦需水量的年际变化与相对湿度的年际变化相反。

ChinaXiv合作期刊

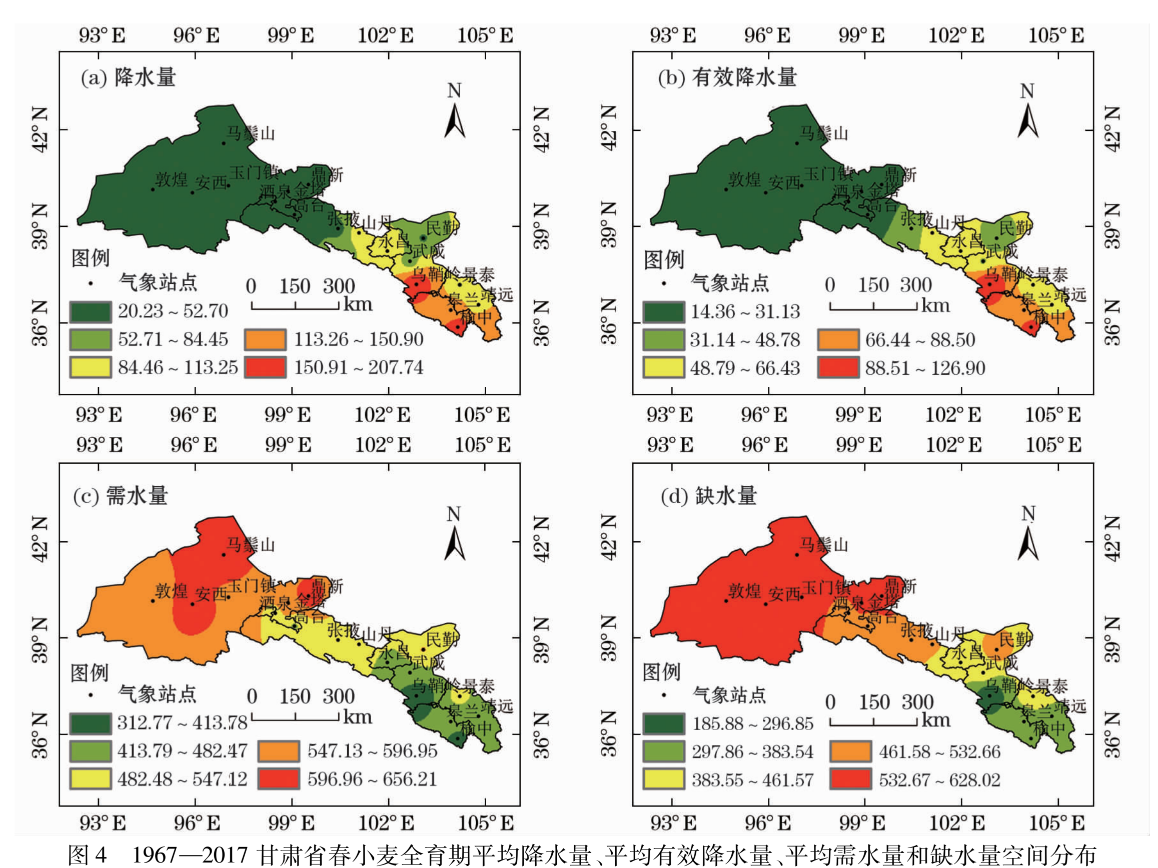


图 4　1967—2017 甘肃省春小麦全育期平均降水量、平均有效降水量、平均需水量和缺水量空间分布

Fig. 4　Average precipitation, effective precipitation, water requirment and water deficit spatial distribution in whole growing period of spring wheat from 1967 to 2017 in Gansu Province

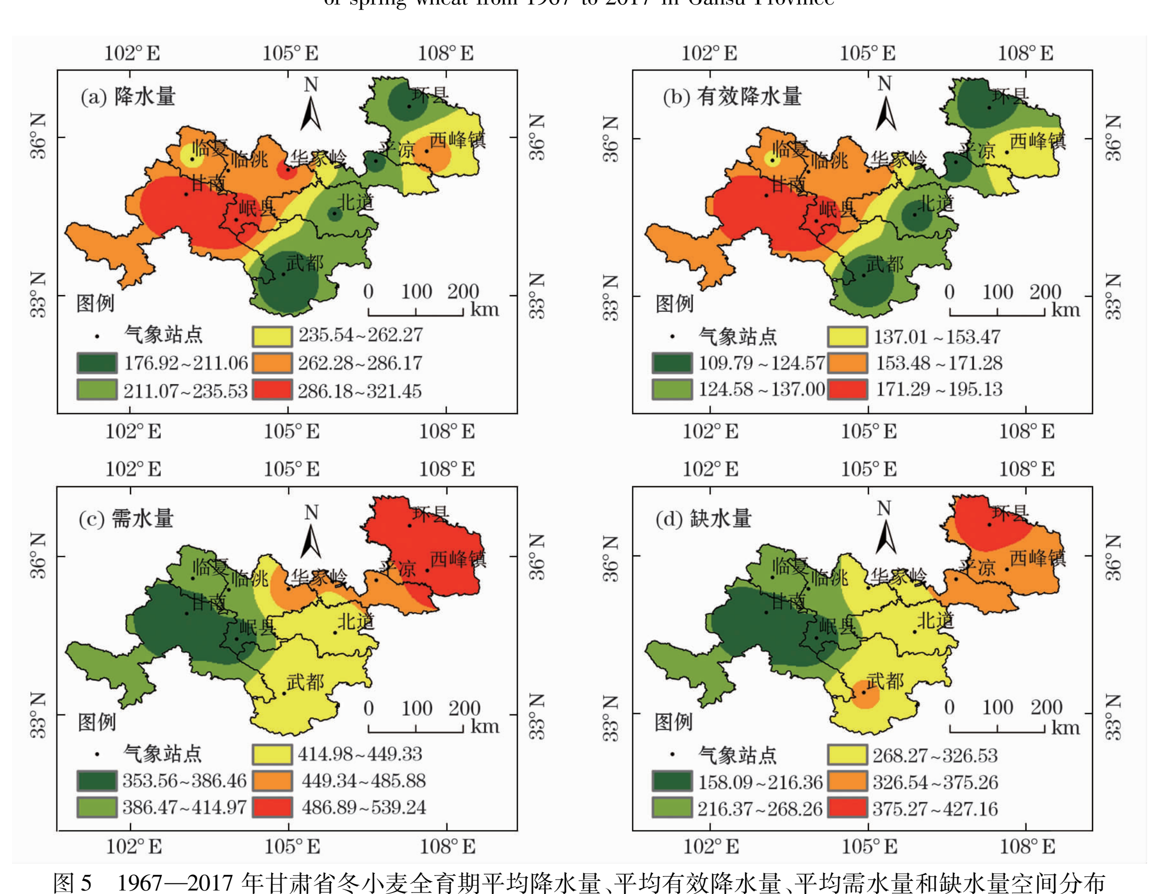


图 5　1967—2017 年甘肃省冬小麦全育期平均降水量、平均有效降水量、平均需水量和缺水量空间分布

Fig. 5　Average precipitation, effective precipitation, water requirment and water deficit spatial distribution in whole growing period of winter wheat frome 1967 to 2017 in Gansu Province

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

表 3　小麦需水量与主要气象因子的关联度

Tab. 3　Correlation degree of wheat water requirement and the major meteorological factors

小麦种植区	日平均气温	日平均相对湿度	日平均 2 m 高风速	日照时数
春小麦	0.822	0.700	0.736	0.825
冬小麦	0.786	0.770	0.744	0.843

表 4　春小麦和冬小麦生育期气象因子的倾向率

Tab. 4　Propensity rate of meteorological factors during the growing period of spring wheat and winter wheat

小麦种植区	日平均气温	日平均相对湿度	日平均 2 m 高风速	平均日照时数
春小麦	0.043 5**	-0.094 5**	0.000 8**	0.000 3
冬小麦	0.035 2**	-0.100 0**	0.000 5	0.792 4*

注:**表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著,*表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著

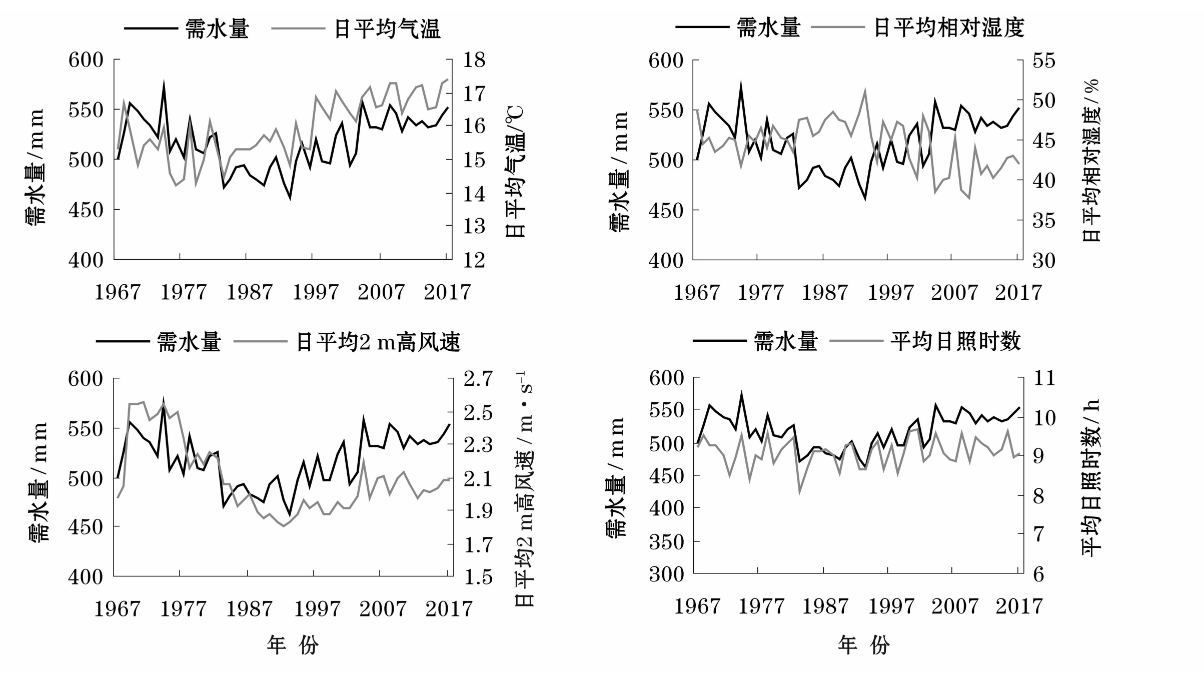


图 6　生育期内气象因子与春小麦需水量变化特征

Fig. 6　Variation characteristics of meteorological factors and water requirement of spring wheat during growth period

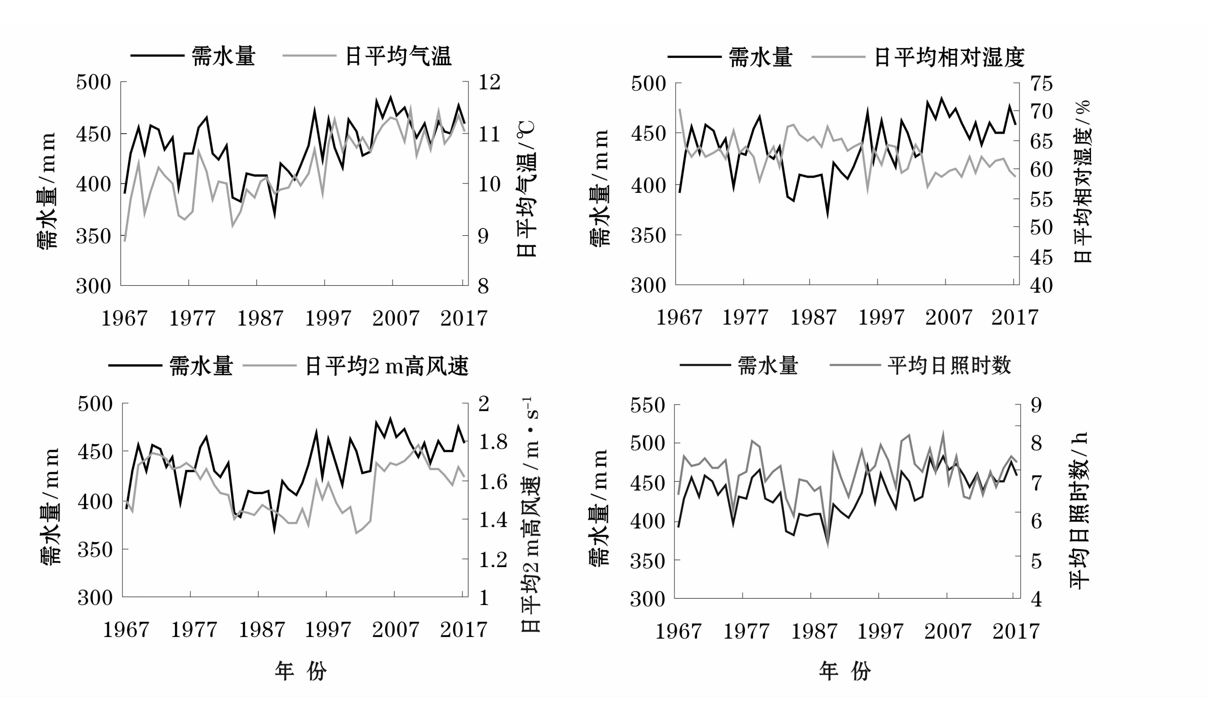


图 7　生育期内气象因子与冬小麦需水量变化特征

Fig. 7　Variation characteristics of meteorological factors and water requirement of winter wheat during growth period

chinaXiv:201909.00155v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00155v1

4 讨 论

本研究考虑到甘肃省地域差异性,将甘肃省划分为春小麦与冬小麦两个种植区,且根据春冬小麦播种期与收获期,计算出甘肃省 28 个气象站点的小麦作物系数。在一定程度上提高了需水量与缺水量的计算精度,对于甘肃省合理指导小麦灌溉具有重要意义。

本研究计算的春小麦种植区内的平均需水量与尹海霞等[36]研究的黑河流域中游地区的平均需水量基本一致。但冬小麦种植区的平均需水量高于杨琦等[21]研究的甘肃省河东地区冬小麦平均需水量,导致这种结果的原因可能是选取的作物系数、气象站点和资料的时间序列不同。本研究计算的生长初期小麦作物系数与 FAO 推荐的作物系数相差较大,可能是因为小麦生长初期日平均 2 m 高风速与 FAO 特定标准下(2 m·s^{-1})的风速有差别,且生长初期日最小相对湿度的平均值与 FAO 特定标准下(45%)的湿度也有差别。导致春小麦种植区需水量变化的最主要的气象因子依次是日照时数、日平均气温、日平均 2 m 高风速和日平均相对湿度,这与王瑶等[37]的研究结果一致。导致冬小麦种植区需水量变化的最主要气象因子依次是日照时数、日平均气温、日平均相对湿度和日平均 2 m 高风速。这与杨琪等[21]的研究成果甘肃省河东地区冬小麦需水量影响最大的是日平均温度和风速有差别。导致需水量变化的因素错综复杂,各气象因子的作用程度不同,要确定各因子的重要程度还有待于进一步研究。

5 结 论

(1) 1967—2017 年甘肃省春、冬小麦全生育期的需水量平均值分别为 517.03 mm 和 436.70 mm,缺水量平均值分别为 468.24 mm 和 301.54 mm。春小麦种植区的需水量与缺水量总体上没有明显的时间变化趋势。冬小麦需水量呈明显的上升趋势,在 2002 年发生突变,突变特征为在 2002 年之前需水量呈下降趋势,2002 年之后呈现上升趋势;缺水量也存在明显的上升趋势,但不存在突变点。

(2) 春小麦种植区的需水量和缺水量大致是从西北向东南方向递减,而降水量大致是从西北向东南递增;冬小麦种植区需水量和缺水量大致呈从西向东减少,而降水量则大致由西向东增加,这与甘肃省的气候有极大关系。甘肃省深居西北内陆,海洋暖湿气流不易到达,导致降水呈东南向西北减少,因而小麦需水量与缺水量呈现上述特征。

(3) 甘肃省小麦需水量最主要的影响因子为日照时数和日平均气温,而日平均相对湿度和日平均 2 m 高风速影响相对较小。小麦需水量与日平均气温、日平均 2 m 高风速和平均日照时数的年际变化特征整体上趋于一致,与日平均相对湿度的年际变化特征整体上相反。

(4) 甘肃省境内,小麦全育期以及各生育阶段的有效降水量均不能满足小麦需水的要求,冬小麦种植区水分满足情况较好一些,而春小麦种植区水分缺损严重。在小麦种植中要尽可能的利用有效降水量,同时为了保证小麦正常生长,需要合理进行灌溉。

参考文献(References)

[1] 曹永强,朱明明,李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报,2018,38(2):560－570.[CAO Yongqiang,ZHU Mingming,LI Weijia. Characteristics of effective rainfall and water demand of main crops in typical areas of Hebei Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):560－570.]

[2] 刘晓英,李玉中,郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报,2005,21(10):155－159.[LIU Xiaoying,LI Yuzhong,HAO Weiping. Changes and causes of water demand of main crops in North China in recent 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(10):155－159.]

[3] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):1－6.[HU Zhiqiao,TIAN Xiaohong,ZHANG Jiudong, et al. Study on water requirement and water requirement of main crops in Shiyang River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(3):1－6.]

[4] 杨艳昭,封志明,林耀明. 甘肃省小麦水分平衡及其时空分布模式[J]. 地理研究,2005,24(6):853－859.[YANG Yanzhao,FENG Zhiming,LIN Yaoming. Water balance and spatial-temporal distribution pattern of wheat in Gansu Province[J]. Geographical Research,2005,24(6):853－859.]

[5] 甘肃省统计局. 甘肃发展年鉴 2017[M]. 北京:中国统计出版社,2018.[Gansu Provincial Bureau of Statistics. Gansu development yearbook 2017[M]. Beijing:China Statistics Press, 2018.]

[6] KATERJI N,RANA G. FAO-56 methodology for determining water requirement of irrigated crops:Critical examination of the concepts,alternative proposals and validation in Mediterranean region[J]. Theoretical & Applied Climatology,2014,116(3－4):515－536.

[7] 宋妮,孙景生,王景雷,等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1693－1700.[SONG Ni,SUN Jingsheng,WANG Jinglei, et al. Spatial and tem-

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00155v1

poral changes of water requirement of winter wheat in Henan Province and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(6):1693－1700.]

[8] 符娜,刘小刚,张岩,等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J]. 生态学杂志,2014,33(7):1895－1901.[FU Na,LIU Xiaogang,ZHANG Yan, et al. Changes of rice irrigation water requirement in Southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology,2014,33(7):1895－1901.]

[9] 陈超,庞艳梅,潘学标,等. 1961—2012 年中国棉花需水量的变化特征[J]. 自然资源学报,2015,30(12):2107－2119.[CHEN Chao, PANG Yanmei, PAN Xuebiao, et al. Characteristics of China's cotton water requirement from 1961 to 2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12):2107－2119.]

[10] PROVENZANO G,GONZÀLESALTOZANO P,MANZANOJUÀREZ J,et al. Using FAO-56 model to estimate soil and crop water status:Application to a citrus orchard under regulated deficit irrigation[C]//European Geosciences Union General Assembly,2015.

[11] 郑东方,许嘉阳,卢秀萍,等. 云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征[J]. 应用生态学报,2015,26(7):2091－2098.[ZHENG Dongfang,XU Jiayang,LU Xiuping, et al. Spatial and temporal characteristics of water requirement and irrigation demand index of flue-cured tobacco in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(7):2091－2098.]

[12] 王梅,杨倩,郑江华,等. 1963—2012 年新疆棉花需水量时空分布特征[J]. 生态学报,2016,36(13):4122－4130.[WANG Mei,YANG Qian,ZHENG Jianghua, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of cotton water demand in Xinjiang from 1963 to 2012[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(13):4122－4130.]

[13] 罗那那,巴特尔・巴克. 北疆地区棉花作物需水量时空演变及其气象影响因子[J]. 应用生态学报,2017,28(10):3305－3313.[LUO Nana,BARKER B. Temporal and spatial evolution of cotton crop water demand and its meteorological impact factors in Northern Xinjiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3305－3313.]

[14] ER-RAKI S,CHEHBOUNI A,GUEMOURIA N,et al. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management,2007,87(1):0－54.

[15] 宋戈,曾季才,王燕,等. 基于 NDVI 估算华北平原冬小麦需水量[J]. 灌溉排水学报,2014,33(6):1－5.[SONG Ge, ZENG Jicai,WANG Yan,et al. Estimation of water requirement of winter wheat in North China Plain based on NDVI[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(6):1－5.]

[16] DRERUP P,BRUECK H,SCHERER H W. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe[J]. Agricultural Water Management, 2017,192:180－188.

[17] 马灵玲,占车生,唐伶俐,等. 作物需水量研究进展的回顾与展望[J]. 干旱区地理,2005,28(4):115－121.[MA Lingling, ZHAN Chesheng,TANG Lingli,et al. Review and prospect of research progress on crop water demand[J]. Arid Land Geography, 2005,28(4):115－121.]

[18] 甘肃年鉴编委会编. 甘肃年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009:34－35.[Gansu Yearbook Editorial Board. Gansu yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press,2009:34－35.]

[19] 邓振镛,尹东,张毅. 甘肃省小麦生态气候适生种植区的研究[J]. 气象科技,2000,24(1):36－40.[DENG Zhenyong,YIN Dong, ZHANG Yi. Study on wheat ecological climate suitable planting area in Gansu Province[J]. Meteorological Science and Technology,2000,24(1):36－40.]

[20] 中国科学院地理研究所经济地理研究室. 中国农业生产布局[M]. 北京:农业出版社,1983:30－53.[Department of Economic Geography, Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Distribution of agricultural production in China[M]. Beijing:Agricultural Press,1983:30－53.]

[21] 杨琪,张勃,尹海霞,等. 甘肃河东地区近 50 年小麦需水量变化趋势及影响因子[J]. 生态学杂志,2013,32(11):3074－3081.[YANG Qi,ZHANG Bo,YIN Haixia,et al. The change trend and influence factors of wheat water requirement in Hedong area of Gansu Province in the past 50 years[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(11):3074－3081.]

[22] 甘肃省气象局业务管理处. 甘肃省农业气象观测资料汇编(1981—1985)[M]. 兰州: 兰州大学出版社. 1988:7－97.[Gansu Provincial Meteorological Bureau Business Management Office. Gansu Province agricultural meteorological observation data collection (1981—1985)[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press,1988:7－97.]

[23] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations,1998:37－58.

[24] 刘钰,PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报,2000,16(5):26－30.[LIU Yu,PEREIRA L S. Verification of the calculation method of crop coefficient recommended by FAO[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2000,16(5):26－30.]

[25] BROUWER C,HEIBLOEM M . Irrigation water management:Irrigation water needs[J]. Training Manual,1986.

[26] SMITH M. CROPWAT:A computer program for irrigation planning and management[M]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations,1992:20－21.

[27] DÖLL Petra,SIEBERT Stefan. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research,2002,38(4):8－1－8－10.

[28] SNEYERS R. On the statistical analysis of series of observations[R]. Geneva,1990.

[29] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:62－76.[WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: Meteorological Press,1999:62－76.]

[30] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:133－290.[XU Jianhua. Mathematical methods in modern geography[M]. Beijing:Higher Education Press,2002:133－290.]

[31] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等. 新疆水文水资源变化及对区域气

ChinaXiv合作期刊

候变化的响应[J]. 地理学报,2009,64(11):1331 - 1341. [CHEN Yaning,XU Changchun,YANG Yuhui, et al. Changes of hydrology and water resources in Xinjiang and their responses to regional climate change[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(11):1331 - 1341.]

[32] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚. 1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报,2009, 24(12):2147 - 2157. [YIN Yunhe,WU Shaohong,CHEN Gang. Regional differences of climate change trends and mutations in China from 1961 to 2006[J]. Journal of Natural Resources,2009,24(12): 2147 - 2157.]

[33] 刘思峰,谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 第 4 版. 北京:科学出版社,2008:40 - 47. [LIU Sifeng,XIE Naiming. Grey system theory and its application [M]. 4th ed. Beijing: Science Press,2008:40 - 47.]

[34] 任玉忠,董新光,王志国. 基于灰色关联分析的参考作物腾发量影响因素分析[J]. 中国农学通报,2010,26(12):376 - 379. [REN Yuzhong,DONG Xinguang,WANG Zhiguo. Analysis of factors affecting reference crop evapotranspiration based on grey correlation analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(12):376 - 379.]

[35] 郝振纯,杨荣榕,陈新美,等. 1960—2011 年长江流域潜在蒸发量的时空变化特征[J]. 冰川冻土,2013,35(2):408 - 419. [HAO Zhenchun,YANG Rongrong,CHEN Xinmei, et al. Temporal and spatial variation characteristics of potential evaporation in the Yangtze River Basin from 1960 to 2011[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(2):408 - 419.]

[36] 尹海霞,张勃,王亚敏,等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学,2012,34(3):409 - 417. [YIN Haixia,ZHANG Bo,WANG Yamin, et al. Analysis of the change trend of crop water requirement in the middle area of the Heihe River Basin in recent 43 years[J]. Resources Science, 2012,34(3):409 - 417.]

[37] 王瑶,赵传燕,田风霞,等. 黑河中游春小麦需水量空间分布[J]. 生态学报,2011,31(9):2374 - 2382. [WANG Yao,ZHAO Chuanyan,TIAN Fengxia, et al. Spatial distribution of spring wheat water requirement in the middle reaches of the Heihe River[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(9):2374 - 2382.]

chinaXiv:201909.00155v1

Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu Province from 1967 to 2017

ZHANG Hua, WANG Hao

(*College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Using the daily meteorological data from 28 stations in Gansu Province, China from 1967 to 2017, the water required by wheat during its growing period was calculated with Penman-monteith formula. The effective precipitation in wheat's whole growing period was calculated based on the method recommended by the USDA Soil Conservation Bureau. So we can get the water deficit of wheat during its life cycle. In addition, we analyzed the variation trend and spatial distribution characteristics of water requirement and water deficit of spring wheat and winter wheat as well as the affect factors of water requirement. The results showed that the annual average water requirement of spring wheat and winter wheat was 517.03 mm and 436.70 mm respectively and the annual average water deficit of spring wheat and winter wheat was 468.24 mm and 301.54 mm respectively in Gansu Province from 1967 to 2017. In the past 51 years, there was no significant change in the water requirement and water deficit in the spring wheat planting area, while there was a significant increase in the water requirement and water deficit in the winter wheat planting area. Spatially, the water requirement and water deficit in spring wheat planting area were decreased gradually from northwest to southeast, while the water requirement and water deficit in winter wheat planting area were decreased gradually from west to east. The sunshine hours and daily average temperature during the growth period of wheat in Gansu province are the main factors affecting the water requirement of wheat.

Key words: Penman-Monteith formula; water requirement; water deficit; effective precipitation; Gansu Province